Iranian Journal of Field Crops Research
Homepage: https://jcesc.um.ac.ir

Research Article
Vol. 21, No. 1, Spring 2023, p. 113-126

Agronomic and Physiological Characteristics of Forage Sorghum (*Sorghum bicolor* L.) under Water Deficit Stress and Silicon Fertilizer

E. Rezaei[1], H. R. Larijani[2*], P. Kasraie[2], H. R. Tohidi Moghadam[2], F. Ghooshchi[2]

Received: 20-09-2022 Revised: 28-10-2022 Accepted: 09-11-2022	**How to cite this article:** Rezaei, E., Larijani, H. R., Kasraie, P., Tohidi Moghadam, H. R., Ghooshchi, F. (2023). Agronomic and Physiological Characteristics of Forage Sorghum (*Sorghum bicolor* L.) under Water Deficit Stress and Silicon Fertilizer. *Iranian Journal of Field Crops Research, 21*(1), 113-126. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jcesc.2022.78887.1198

Introduction

The quantity and quality of forage plants are beneficial and useful due to their role in animal husbandry, reproduction and other livestock products. Due to the limitation of water resources, water-deficit as a significant biotic stress is the most severe threat to world food security and is responsible for many yield losses. Plants constantly modify their physiological processes in response to various biotic and abiotic stress to regulate the balance between plant growth and defense response. Many researchers have documented that plant nutrients are involved in biological processes of plants. It has been stated that the use of silicon by increasing the ability to absorb water can be useful to improve drought tolerance of sorghum, sorghum can with the help of silicon extract more water from dry soil and maintain more stomatal conductance.

Materials and Methods

In order to evaluate the effect of silicon fertilizer on the quantitative and qualitative yield of forage sorghum (*Sorghum bicolor* L.) under water-deficit stress, a split-plot experiment was performed in a randomized complete block design in at the research farm of Varamin, Iran in 2017-2018. The treatments included irrigation in three levels irrigation in field capacity and irrigation at 60% and 45% of field capacity (which were named as full irrigation, moderate and severe water-deficit stress, respectively) as the main plot and silicon fertilizer (Potassium Silicate) in three levels, non-use (control), silicon foliar spraying (three per thousand), and silicon fertigation (10 L ha^{-1}) as the subplot. Silicon spraying with a ratio of three per thousand and silicon irrigation fertilizer at the rate of 10 liters per hectare were considered in three stages.

Results and Discussion

The highest (4.51) and lowest (2.88) leaf area index were achieved in silicon fertigation treatment under full irrigation and none fertilizer treatment and severe water-deficit conditions, respectively. Based on the obtained results, the highest total chlorophyll content (1.73 mg g^{-1} FW), relative water content of leave (88.08%), stomatal conductance (2.46 cm s^{-1}) were achieved in fertigation treatment under full irrigation conditions. The results show that the amount of electrolyte leakage increased due to water-deficit stress, but silicon fertilizer decreased the adverse effect of stress conditions. The lowest level of electrolyte leakage (341.3 µS cm^{-1}) was obtained from the full irrigation and fertigation treatment. The highest crude protein (11.41%) which was higher than full irrigation condition by 1.39% related to severe water-deficit stress. Water-deficit stress caused the increase of cyanuric acid in shoot and increased the content of cyanuric acid by 41.8% compared to full irrigation conditions. Silicon fertilizer led to a decrease in digestible dry matter under water stress conditions, but on the other hand, it led to an increase in the amount of crude protein and also a decrease in the amount of toxic cyanide

1- Ph.D. graduated student, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Islamic Azad University, Varamin-Pishva Branch, Varamin, Iran
2- Assistant Professor, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Islamic Azad University, Varamin-Pishva Branch, Varamin, Iran
(*- Corresponding Author Email: Hamidrezalarijani@yahoo.com)
https://doi.org/10.22067/jcesc.2022.78887.1198

acid in the shoot production. The results of this study show that the use of silicon fertilizer in all irrigation regimes increased the auxin content compared to the non-use of silicon fertilizer. The highest content of auxin was achieved in the conditions of full irrigation and fertigation treatment (131.4 nmol g^{-1} of protein) followed by foliar fertilizer treatment (128.2 nmol g^{-1} of protein). The highest sorghum dry matter production was obtained from the full irrigation treatment with an average of 23.7 ton ha^{-1}, which was 20 and 54% higher than the treatment of moderate and severe water-deficit treatment, respectively.

Conclosion

In general, it can be concluded that silicon fertilizer in the form of foliar spraying should be considered by farmers to maintain the natural growth and development of sorghum plant, especially in areas arid and semi-arid. However, its widespread use in other farm crops needs to be investigated.

Keywords: Auxin, Chorophyll, Crude protein, Cyanidric acid, Dry matter digestibility

نشریه پژوهشهای زراعی ایران
Homepage: https://jcesc.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۲۱، شماره ۱، بهار ۱٤۰۲، ص ۱۲٦-۱۱۳

بررسی خصوصیات زراعی و فیزیولوژیک سورگوم علوفه‌ای (*Sorghum bicolor* L.) تحت تأثیر تنش کم‌آبی و کود سیلیس

احسان رضایی[۱]، حمیدرضا لاریجانی[۲*]، پورنگ کسرائی[۲]، حمیدرضا توحیدی مقدم[۲]، فرشاد قوشچی[۲]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۲۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۸

چکیده

به‌منظور ارزیابی کود سیلیس بر عملکرد کمی و کیفی سورگوم علوفه‌ای (*Sorghum bicolor* L.) در شرایط تنش کم‌آبی، آزمایشی به‌صورت کرت‌های یک‌بار خردشده در قالب طرح بلوک‌های تصادفی در سال ۱۳۹۷ در شهرستان ورامین اجرا گردید. تیمارهای مورد بررسی شامل آبیاری تا حد ظرفیت زراعی (آبیاری مطلوب) و آبیاری در ۶۰ و ۴۵ درصد ظرفیت زراعی (به‌ترتیب کم‌آبیاری متوسط و کم‌آبیاری شدید) به‌عنوان عامل اصلی و کود سیلیس (سیلیکات پتاسیم در سه مرحله) به‌صورت عدم مصرف، محلول‌پاشی و کودآبیاری به‌عنوان عامل فرعی در نظر گرفته شدند. بر اساس نتایج به‌دست آمده بیشترین محتوی کلروفیل کل ($1/73$ mg g^{-1} FW)، محتوی نسبی آب برگ (۸۸/۰۸٪) و هدایت روزنه‌ای ($2/46$ cm s^{-1}) در تیمار آبیاری مطلوب و استفاده از کود سیلیس در آب آبیاری به‌دست آمد. بیشترین میزان پروتئین خام (۱۱/۴۱٪) در تیمار کم‌آبی شدید برآورد گردید به‌طوری‌که نسبت به آبیاری مطلوب ۱/۳۹ درصد بیشتر بود. تنش کم‌آبی باعث افزایش اسید سیانیدریک اندام هوایی شد به‌نحوی‌که باعث افزایش ۴۱/۸ درصد محتوی اسید سیانیدریک نسبت به شرایط مطلوب آبیاری گردید. بیشترین عملکرد اندام هوایی خشک سورگوم در تیمار آبیاری مطلوب با میانگین ۲۳/۷ تن در هکتار به‌دست آمد که نسبت به تیمار تنش متوسط و شدید کم‌آبی، به‌ترتیب ۲۰ و ۵۴ درصد بیشتر بود. کود سیلیس (محلول‌پاشی سه در هزار، کود آبیاری ۱۰ لیتر در هکتار) منجر به کاهش ماده خشک قابل هضم گردید ولی از طرف دیگر منجر به افزایش میزان پروتئین خام و همچنین کاهش ماده سمی اسید سیانیدریک در اندام هوایی شد و در این بین محلول‌پاشی کود سیلیس موثر تر از مصرف در آب آبیاری بود. بنابراین می‌توان پیشنهاد نمود که محلول‌پاشی کود سیلیس برای حفظ رشد و نمو گیاه سورگوم به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مد نظر کشاورزان قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: اسید سیانیدریک، پروتئین خام، کلروفیل، ماده خشک قابل هضم، هورمون اکسین

مقدمه

کمیت و کیفیت گیاهان علوفه‌ای در تغذیه و پرورش دام سایر فرآورده‌های آن بسیار مفید و مؤثر می‌باشد (Hayes *et al*., 2013). با توجه به کمبود منابع آبی، کم‌آبی به‌عنوان یک عامل تنش‌زا، شدیدترین تهدید برای امنیت غذایی جهان می‌باشد و مسئول بسیاری از خسارات در گیاه است. گیاه سورگوم (*Sorghum bicolor* L.) بعد از گندم (*Triticum aestivum* L.)، برنج (*Oryza sativa* L.)، ذرت (*Zea mays* L.) و جو (*Hordeum vulgare* L.) پنجمین غله مهم دنیاست (FAO, 2020).

گیاه سورگوم این قابلیت را دارد که خود را با شرایط نامساعد محیطی مطابقت دهد و بر همین اساس بیشتر در مناطق گرم و خشک که برای کشت سایر گیاهان علوفه‌ای نظیر ذرت مناسب نیست، کشت می‌شود (Hadebe *et al*., 2017). تنش کم‌آبی، باعث ایجاد تغییراتی در میزان آب نسبی برگ، میزان آب نسبی از دست رفته، محتوی کلروفیل، تجمع پرولین، تنظیم اسمزی و پارامترهای دیگر نظیر تبادل روزنه‌ای (CO_2) در ارتباط می‌باشند (Keshavarz & Khodabin, 2019). به‌طورکلی تنش کم‌آبی از طریق کاهش

۱- دانش‌آموخته دکتری، گروه زراعت، گروه کشاورزی، واحد ورامین-پیشوا، دانشگاه آزاد اسلامی، ورامین، ایران
۲- استادیار، گروه زراعت، گروه کشاورزی، واحد ورامین-پیشوا، دانشگاه آزاد اسلامی، ورامین، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: Hamidrezalarijani@yahoo.com)
https://doi.org/10.22067/jcesc.2022.78887.1198

سطح برگ، بسته شدن روزنه‌ها، کاهش قابلیت هدایت روزنه‌ها، کاهش آبگیری کلروپلاست و سایر بخش‌های پروتوپلاسم و کاهش ساخت پروتئین و کلروفیل، سبب تقلیل فرآیند فتوسنتز و در نهایت سبب کاهش رشد و عملکرد گیاه می‌شود (Rizal *et al*., 2014). در بررسی اثر تنش خشکی بر سورگوم مشاهده شد که علاوه بر عملکرد، ویژگی‌های کیفی ذرت نیز تحت تأثیر تنش قرار می‌گیرد، به طوری‌که میزان پروتئین افزایش و نشاسته کاهش یافت (Jabereldar *et al*., 2017). نتایج آزمایش دیگری نیز حاکی از کاهش هیدرات‌های کربن دانه در تیمار تنش کم‌آبی بود (Menezes *et al*., 2015). شاخص سطح برگ نیز تحت تأثیر تنش کم‌آبی قرار می‌گیرد و به شدت کاهش می‌یابد به طوری‌که یک دوره تنش کم‌آبی باعث کاهش ۲۰ درصدی شاخص سطح برگ سورگوم شد (Ahmed *et al*., 2016).

اگرچه سیلیس از عناصر تشکیل‌دهنده پوسته زمین می‌باشد اما به دلیل ترکیب با سایر عناصر، تنها به شکل سیلیسیک اسید ($Si(OH)_4$) برای گیاهان قابل جذب است. این عنصر جزو عناصر ضروری برای گیاهان نمی‌باشد اما نتایج مطالعات حاکی از تأثیر مثبت سیلیکون در رشد و عملکرد گیاه در هر دو شرایط مطلوب و تنش بوده است (Tahir *et al*., 2006). از طرف دیگر بیان شده است که کاربرد سیلیس با افزایش توانایی جذب آب می‌تواند برای بهبود تحمل به خشکی سورگوم مفید باشد، سورگوم با کمک سیلیس می‌تواند مقدار بیشتری آب را از خاک خشک استخراج کرده و هدایت روزنه بیشتری را حفظ کند (Ghanem *et al*., 2019). سیلیس با بهبود ویژگی‌های مورفولوژیک برگ و گل مانند افزایش سطح برگ، ضخامت برگ، قطر گل، سطح گلبرگ و ضخامت گلبرگ باعث افزایش وزن تر و خشک نیز می‌شود (Ahmed & Rajab, 2017). سیلیس با افزایش رنگیزه‌های فتوسنتزی، افزایش فعالیت آنزیم روبیسکو و ظرفیت فتوسنتزی، کاهش تنش اکسیداتیو و حفاظت ماکرو مولکول‌هایی نظیر پروتئین‌ها و غشای کلروپلاستی و غشای سلولی باعث افزایش فتوسنتز شده و در نتیجه میزان قندهای محلول و پروتئین خام موجود در گیاهان را افزایش می‌دهد (Amin *et al*., 2018). در گزارش دیگر بیان شد که استفاده از سیلیس فشار تورم را از طریق بهبود کارای مصرف آب و محتوی نسبی آب برگ افزایش می‌دهد (Kalteh *et al*., 2014). سایر بررسی‌ها حاکی از افزایش کربوهیدرات‌های محلول برگ گیاه سورگوم (*Sorghum bicolor*) تحت تأثیر مصرف سیلیس بود (Yin *et al*., 2013).

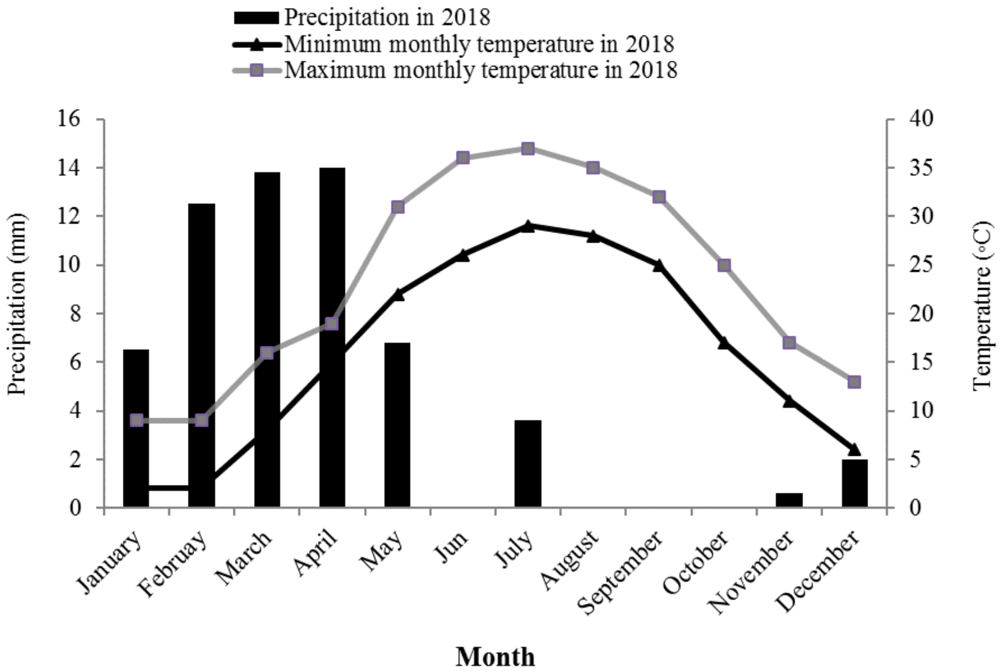
لذا با توجه به اهمیت معضل کم‌آبی در کشاورزی و گستردگی روزافزون آن و همچنین نیاز به تولید علوفه با کیفیت بالا در کشور این تحقیق با هدف بررسی تأثیر کود سیلیس در شرایط کم‌آبی بر خصوصیات کمی و کیفی گیاه سورگوم انجام شده است.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال ۱۳۹۷ در شهر ورامین- ایران واقع در عرض جغرافیایی ۳۵/۲۱ شرقی و طول جغرافیایی ۵۱/۳۸ شمالی و در ارتفاع ۹۲۷ از سطح دریا قرار انجام پذیرفت. آب و هوای این منطقه خشک و نیمه‌خشک و میانگین بارش ۳۸ سال گذشته آن ۲۵۱ میلی‌متر بوده است، میانگین سالانه درجه حرارات هوا آن $^{\circ}C$ ۱۶/۵، میانگین درجه حرارت خاک $^{\circ}C$ ۱۵/۵ می‌باشد (شکل ۱).

پیش از انجام آزمایش برای تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، نمونه‌برداری از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری خاک صورت پذیرفت. نتایج حاصل از تجزیه خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول ۱ نشان داده شده است. آزمایش به‌صورت اسپلیت پلات بر پایه بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار اجرا گردید. تیمارهای مورد بررسی شامل سه سطح آبیاری به‌عنوان عامل اصلی شامل آبیاری تا حد ظرفیت زراعی (آبیاری مطلوب)، مصرف ۴۰ درصد رطوبت قابل استفاده خاک در عمق توسعه ریشه و سپس آبیاری تا حد ظرفیت زراعی (کم‌آبیاری متوسط) و مصرف ۵۵ درصد رطوبت قابل استفاده خاک در عمق توسعه ریشه و سپس آبیاری تا حد ظرفیت زراعی (کم‌آبیاری شدید) و استفاده از کود سیلیس به‌عنوان عامل فرعی شامل (۱) عدم استفاده از سیلیس (شاهد)، (۲) محلول‌پاشی سیلیس با نسبت سه در هزار، (۳) کود آبیاری سیلیس به میزان ۱۰ لیتر در هکتار در نظر گرفته شد.

تا مرحله چهار برگی سورگوم، آبیاری تمامی کرت‌ها به‌صورت یکسان انجام شد و سطوح مختلف آبیاری پس از این مرحله اعمال گردید. آبیاری این آزمایش به‌صورت قطره‌ای و قطر هر نوار آبیاری ۱۶ mm، فاصله هر قطره‌چکان ۱۵ cm و سرعت جریان ۲ لیتر در ساعت بود. برای تعیین سطوح مختلف آبیاری از روابط ارائه شده توسط بهرا و پاندا (Behera & Panda, 2009) استفاده شد که برنامه زمان‌بندی آبیاری بر اساس درصد تخلیه آب خاک در منطقه ریشه تعیین می‌شود. مقدار آب خاک با استفاده از دستگاه انعکاس‌سنجی زمانی (Time Domain Reflectometry, TDR) در عمق ذکر شده تعیین شد. نسبت به نقطه ظرفیت زراعی از منحنی‌های کالیبراسیون برای تعیین رابطه بین مقدار عددی ارائه شده توسط دستگاه و مقدار حجمی رطوبت خاک استفاده گردید (Keshavarz Mirzamohammadi *et al*., 2021a).



شکل ۱- میزان بارندگی ماهانه، حداکثر و حدقل دما در منطقه ورامین در سال ۹۸- ۱۳۹۷

Figure 1- Precipitation and maximum and minimum temperatures in Varamin in 2018

جدول ۱- تجزیه فیزیکی-شیمیایی خاک

Table 1- Soil physico-chemical analysis

عمق خاک Depth (cm)	بافت خاک Soil texture	اسیدیته خاک pH	هدایت الکتریکی Electrical Conductivity ($dS\ m^{-1}$)	نقطه پژمردگی دائم PWP (%)	ظرفیت زراعی مزرعه Field Capacity (%)
0-30	clay	7.3	3.8	10.78	16

نیتروژن N (ppm)	پتاسیم K (ppm)	فسفر P (ppm)	مس Cu (ppm)	منگنز Mg (ppm)	روی Zn (ppm)	آهن Fe (ppm)	کربن آلی Organic carbon (%)
1.1	210	10	2.2	2.5	1.1	1.5	0.8

زمان استفاده از کود سیلیس از منبع سیلیکات پتاسیم (K_2O - 10%, SiO_2 - 20%) در سه مرحله شامل مرحله پنج برگی (مرحله رشدی ۲) و قبل از اولین گلدهی (مرحله رشدی ۵) (Eastin, 1980) و ۲۰ روز پس از برداشت اول سورگوم اجرا گردید. زمین آزمایش با انجام شخم، دیسک و ماله برای کاشت آماده گردید. به میزان ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود فسفات آمونیوم و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره به‌عنوان کود اولیه استفاده شد. خطوط کاشت به‌وسیله فاروئر ایجاد و نقشه آزمایش پیاده‌سازی گردید. فاصله خطوط از هم ۶۰ سانتی‌متر و هر تیمار شامل چهار خط به طول پنج متر آماده شد. در زمان کاشت (هفته اول خرداد ماه) به میزان ۱۰ کیلوگرم در هکتار بذر سورگوم (رقم Speedfeed)، تهیه شده از مؤسسه تحقیقات نهال و بذر کرج) طبق نقشه آزمایشی به روش دستی کشت گردید. در طول دوره رشد عملیات داشت شامل سله‌شکنی در فاروهای آبیاری، تنک و واکاری، وجین علف‌های هرز و آبیاری انجام گردید. کلیه متغیرهای مورد بررسی این آزمایش در مرحله گلدهی گیاه سورگوم اندازه‌گیری شد. شاخص سطح برگ (یک متر مربع) با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری شاخص سطح برگ (Delta-T area meter; Delta-T Devices Ltd., Cambridge, UK) مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. محتوی نسبی آب برگ (RWC) با استفاده از رابطه Levitt (1980) اندازه‌گیری شد (رابطه ۱).

$$RWC = (FW - DW/SW - DW) \times 100 \quad (۱)$$

در این معادله، FW وزن تر، DW وزن خشک و SW وزن آماس

علوفه سورگوم می‌باشد.

اندازه‌گیری هدایت روزنه‌ای برگ‌ها با استفاده از دستگاه Mk3 T-Delta Porometer مدل AP3 ساخت کشور آمریکا در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۴۰ درصد در ساعت ۱۱ تا ۱۲ صبح صورت گرفت. جهت اندازه‌گیری نشت یونی از روش شی و همکاران (Shi *et al*., 2006) مورد ارزیابی قرار گرفت. اندازه‌گیری کلروفیل کل نیز از روش لیچتنثالر (Lichtenthaler, 1987) انجام پذیرفت (رابطه ۲).

$$\text{Chlorophyll total (mg.g}^{-1}\text{)}=[12.7(A_{663})-2.69\ (A_{645})] \times \frac{V}{1000W}$$ (۲)

V: حجم نهایی عصاره؛ W: وزن نمونه برگ.

وزن خشک و تر علوفه سورگوم از مجموع دو چین علوفه در زراعی محاسبه گردید (چین اول ۲۶ مرداد و چین دوم ۲۵ آبان). بر همین اساس با حذف یک خط کاشت به‌عنوان حاشیه، مساحت دو متر مربع از هر کرت برداشت گردید و نمونه هر تیمار توزین و به‌عنوان عملکرد علوفه تر بر حسب تن در هکتار محاسبه شد. سپس جهت اندازه‌گیری وزن خشک علوفه از هر تیمار به‌طور تصادفی یک نمونه یک کیلوگرمی تهیه گردید و به مدت ۴۸ ساعت در دستگاه آون با دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد خشک گردید. سپس عملکرد علوفه خشک برای سطح یک هکتار بر حسب تن محاسبه شد.

پس از محاسبه وزن خشک هر چین سورگوم برای تعیین خصوصیات کیفی سورگوم، از مجموع دو مرحله برداشت، یک نمونه ۵۰۰ گرمی علوفه خشک به‌طور تصادفی انتخاب و از آن برای تعیین ماده خشک قابل‌هضم (Dry matter digestibility)، پروتئین خام (Crude protein) استفاده شد (Jafari *et al*., 2003). هورمون اکسین (Indole acetic acid) از روش ونگ و همکاران (Wang *et al*., 2015) به‌دست آمد. بدین صورت که ۱ گرم بافت برگ در ۱۰ میلی‌لیتر اتانول ۸۰ درصد جوشانده و سپس به‌وسیله سانتریفیوژ صاف شد و یک میلی‌لیتر از عصاره به‌دست آمده با ۲ میلی‌لیتر از معرف سالکوفسکی (He *et al*., 2002) مخلوط شد. ترکیب به‌دست آمده به مدت ۱۵ دقیقه در حمام آب گرم ۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد قرار گرفتند تا رنگ آن به رنگ صورتی تغییر یابد. در پایان، میزان جذب نمونه‌ها در طول موج ۵۳۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر مدل (Varian Cary Win UV 6000i, Australia) خوانده شد. در نهایت با استفاده از نمودار استاندارد، میزان اکسین نمونه‌ها محاسبه شد. به‌منظور تهیه معرف سالکوفسکی، ۱ میلی‌لیتر محلول کلریدفری ۰/۵ مولار با ۵۰ میلی‌لیتر اسید پرکلریک ۳۵ درصد مخلوط و هم زده شد. میزان اسید سیانیدریک و به روش تیتراسیون به‌دست آمد (Blaney, 2002). محاسبات آماری با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS و مقایسه میانگین با آزمون حداقل تغییرات معنی‌دار (LSD) انجام شد.

نتایج و بحث

شاخص سطح برگ

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان‌دهنده آن بود که علاوه بر اثرات ساده، اثر متقابل تنش خشکی در کود سیلیس بر شاخص سطح برگ معنی‌دار ($p \leq 0.01$) گردید. بیشترین شاخص سطح برگ با میانگین ۴/۵۱ در شرایط آبیاری مطلوب همراه با کاربرد کود سیلیس در آب آبیاری و کمترین شاخص سطح برگ (۲/۸۸) در تیمار تنش شدید کم‌آبیاری و عدم مصرف کود سیلیس حاصل شد که اختلافی ۳۶٪ داشتند (جدول ۳).

در ساعات اولیه تنش کم‌آبی، سلول‌های گیاهی آب خود را از دست داده و چروکیده می‌شوند. اگرچه در مراحل بعدی، سلول‌ها حجم واقعی خود را بازیابند اما سرعت رشد سلول کاهش می‌یابد که این امر منجر به کاهش سرعت رشد برگ می‌شود. حتی ممانعت از رشد ساقه‌های جانبی در شرایط تنش منجر به مرگ تعدادی از برگ‌ها می‌شود (Lauriault *et al*., 2012). به نظر می‌رسد تنش کم‌آبی با ایجاد تغییرات در پتانسیل آب برگ و تقسیمات سلولی و تأمین نشدن مواد پرورده مورد نیاز برای رشد برگ منجر به کاهش شاخص سطح برگ شده است. اما استفاده از سیلیس منجر به تجمع آن در برگ‌ها شد که در نتیجه استحکام کششی بیشتری به برگ‌ها داده است (Asadpour *et al*., 2022) که این حالت در شرایط تنش نیز نمود پیدا کرده است. گزارش شده که افزایش اندازه برگ در سورگوم تیمارشده با سلیکون به دلیل افزایش ابعاد سلول بوده است و نه تعداد سلول که بیانگر اثر سلیکون روی طویل شدن سلول و نه تقسیم سلولی است (Ahmed *et al*., 2011).

محتوی نسبی آب

نتایج تجزیه واریانس مندرج در جدول ۲ نشان داد که علاوه بر اثرات ساده، اثر متقابل تنش خشکی در کود سیلیس بر محتوی نسبی آب معنی‌دار ($p \leq 0.01$) بود. بر اساس نتایج این تحقیق (جدول ۳) بیشترین محتوی نسبی آب برگ (۸۸/۰۸٪) در تیمار آبیاری مطلوب و کاربرد سیلیس به‌صورت کود آبیاری سیلیس به‌دست آمد. در همین شرایط آبیاری، محلول‌پاشی کود سیلیس نیز افزایش معنی‌داری در میزان محتوی نسبی آب برگ نسبت به عدم مصرف کود داشت. از طرف دیگر کمترین میزان محتوی نسبی آب برگ در تیمار تنش متوسط کم‌آبیاری و عدم مصرف کود سیلیس با میانگین ۶۵/۰۵ درصد به‌دست آمد. نتیجه قابل‌توجه دیگر این بود که استفاده از کود سیلیس به‌صورت آب آبیاری و همین‌طور به‌صورت محلول‌پاشی در تیمار تنش متوسط کم‌آبیاری به‌ترتیب با میانگین‌های ۷۸/۳۲٪ و ۷۹/۹۸٪ با تیمار شرایط مطلوب آبیاری و عدم مصرف کود سیلیس با

میانگین ۸۰/۳٪ در یک گروه آماری قرار گرفتند که این نشان‌دهنده اهمیت کود سیلیس در حفظ رطوبت در شرایط تنش کم‌آبی را نشان می‌دهد.

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) صفات مورد بررسی تحت تأثیر تیمارهای آبیاری و کودی

Table 2- Results of analysis of variance (mean of squares) of studied traits affected by irrigation regimes and fertilizer treatments

منابع تغییر Source of variation	درجه آزادی df	شاخص سطح برگ LAI	محتوی نسبی آب برگ RWC	نشت یونی Electrolyte leakage	هدایت روزنه‌ای Stomatal conductance	کلروفیل کل Chlorophyll
Block بلوک	2	0.11ns	138.5ns	28014ns	0.12ns	0.014ns
Irrigation آبیاری	2	9.75**	1610.5*	298024**	3.57**	6.62**
Main error خطای اصلی	4	0.28	126.9	4657	0.037	0.0022
Fertilizer تیمار کودی	2	1.96**	774.9**	40363**	1.65**	0.20**
آبیاری×کود Irrigation×Fertilizer	4	0.65**	223.2**	7705**	0.31**	0.021**
Error خطای کل	66	0.054	18.8	986.8	0.037	0.0043
CV (%) ضریب تغییرات		6.3	5.8	6.6	9.3	6.0

ns، * و **: به‌ترتیب بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار و اختلاف معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد می‌باشد.

ns, * and **: Non-significant and, significant at 1% and 5% probability level, respectively.

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) صفات مورد بررسی تحت تأثیر تیمارهای آبیاری و کودی

Table 3- Results of analysis of variance (mean of squares) of studied traits affected by irrigation regimes and fertilizer treatments

آبیاری Irrigation	کوددهی Fertilization	شاخص سطح برگ LAI	محتوی نسبی آب برگ RWC (%)	نشت یونی Electrolyte leakage (μs cm^{-1})	هدایت روزنه‌ای Stomatal conductance (cm s^{-1})	کلروفیل کل Chlorophyll (mg g^{-1} FW)
آبیاری کامل (بدون تنش) Full irrigation	عدم مصرف No application	4.02b	80.3b	377.8d	2.36abc	1.47c
	محلول‌پاشی Foliar spray	4.14b	82.43b	363.3de	2.43ab	1.67b
	آب آبیاری Fertigation	4.51a	88.08a	341.3e	2.46a	1.73a
تنش متوسط کم‌آبی Moderate deficit stress	عدم مصرف No application	3.13cd	61.46e	551.3b	1.76e	0.95f
	محلول‌پاشی Foliar spray	4.07b	79.98b	535.9b	2.20c	1.04e
	آب آبیاری Fertigation	3.95b	78.32b	423.7c	2.25bc	1.12d
تنش شدید کم‌آبی Severe water deficit stress	عدم مصرف No application	2.88e	65.05de	600.1a	1.2f	0.59h
	محلول‌پاشی Foliar spray	3.24c	72.6c	559.4b	1.92de	0.65gh
	آب آبیاری Fertigation	2.96de	67.87de	537.5b	1.95d	0.67g
LSD value (5%)		0.24	4.69	32.5	0.18	0.061

حروف مشابه در ستون میانگین، فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ (براساس آزمون LSD) می‌باشند.

Means having similar letters have no significant difference at 5% probability level by LSD test.

تنش کم‌آبی منجر به تولید و ارسال اسید آبسزیک به قسمت‌های بالایی گیاه شده که در نتیجه با انسداد روزنه‌های بـرگ و ممانعـت از حرکت آب از ریشه به بخش‌هـای بـالاتر گیاهـان، باعـث پسـابیدگی شدن شدید برگ و سایر قسمت‌ها می‌شود. بنابراین می‌توان این گونه

بیان کرد که با بسته شدن روزنه‌ها حرکت آب از آپوپلاست و سیمپلاست کاهش پیدا می‌کند. گزارش شده که استفاده از سیلیکون می‌تواند منجر به استحکام آوندهای چوبی (ساختارهای مسئول انتقال آب به گیاه)، شود که در نهایت منجر به افزایش جذب آب می‌گردد (Ahmadi *et al*., 2015). از آن‌جا که آوندهای آبکش می‌توانند موجب افزایش تحمل گیاه به تنش‌های محیطی گردد (Ali *et al*., 2019)، می‌توان این‌گونه استنباط کرد که سیلیکون با رسوب در کوتیکول برگ موجب کاهش خروج رطوبت از طریق تبخیر می‌گردد. در این خصوص تأثیر مثبت کود سیلیس بر محتوی نسبی آب در شرایط دمای بالای ناشی از کشت دیرهنگام توسط دیگر محققین نیز گزارش شده است (Asadpour *et al*., 2022).

نشت یونی

نشت یونی به‌طور معنی‌داری ($p \leq 0.01$) تحت تاثیر اثرات ساده و متقابل تنش کم‌آبی و کود سیلیس قرار گرفت (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین (جدول ۳) نشان‌دهنده‌ی آن بود که با اعمال تنش کم‌آبیاری میزان نشت یونی سلول‌های گیاه سورگوم افزایش یافت ولی با کاربرد کود سیلیس میزان خسارت کاهش نشان داد، به‌طوری که کمترین میزان نشت یونی در تیمار آبیاری مطلوب و مصرف کود سیلیس به‌صورت کود آبیاری با میانگین (۳۴۱/۳ µS cm^{-1}) و بیشترین میزان نشت یونی حاصل در تیمار تنش شدید کم‌آبیاری و عدم مصرف کود سیلیس با میانگین (۶۰۰/۱ µS cm^{-1}) به‌دست آمد که اختلافی ۴۳ درصدی با هم داشتند. گزارش شده که بروز تنش‌های محیطی از طریق افزایش نشت یونی منجر به کاهش فعالیت فتوسنتزی می‌گردد (Keshavarz Mirzamohammadi *et al*., 2021a) اما مصرف سیلیس و رسوب آن در غشای سلولی باعث سخت‌تر شدن سلول و در نهایت کاهش میزان نشت یونی می‌شود (Moussa, 2006). در این رابطه نتایج تحقیقی بر روی لوبیا (*Phaseolus vulgaris* L.) نشان داد که مقدار نشت یونی با افزایش تنش به‌طور معنی‌داری در مقایسه با شاهد افزایش داشت که محققان علت آن را غیر فعال شدن آنزیم‌های غشایی و تخریب چربی‌های غشای سلولی عنوان کردند (Keshavarz & Khodabin, 2019). از آن‌جا که سلیکون باعث افزایش جذب پتاسیم و در نتیجه تغییر در نسبت پتاسیم به سدیم می‌شود (Artyszak, 2018)، می‌توان چنین استنباط کرد که چنین آسیبی به خاطر مکانیسم‌های متنوع شامل اکسیداسیون و مهار پروتئین‌های غشایی (H^+-ATPase) یا تغییر در ترکیب و سیالیت لیپیدهای غشاء باشد و سلیکون با حفظ فعالیت H^+-ATPase از خسارات ناشی از تنش می‌کاهد.

هدایت روزنه‌ای

در این مطالعه هدایت روزنه‌ای به‌طور معنی‌داری ($p \leq 0.01$) تحت تأثیر اثرات اصلی و متقابل رژیم‌های آبیاری و کود سیلیس قرار گرفت (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین بیانگر آن بود که بیشترین هدایت روزنه‌ای در شرایط آبیاری مطلوب و به همراه کاربرد کود سیلیس درآب آبیاری (۲/۴۶ cm s^{-1})، محلول‌پاشی (۲/۴۳ cm s^{-1}) و عدم کاربرد سیلیس (۲/۳۶ cm s^{-1}) به‌دست آمد. از طرف دیگر تیمار تنش شدید کم‌آبیاری و عدم مصرف کود سیلیس کمترین میزان هدایت روزنه ای با میانگین ۱/۲ cm s^{-1} به‌دست آمد (جدول ۳). به نظر می‌رسد که کود سیلیس در شرایط تنش مانع بسته شدن روزنه‌ها شده و این امر منجر به افزایش و حفظ آسیملاسیون CO_2 می‌گردد. نتایج مشابهی در خصوص کاهش هدایت روزنه‌ای گیاه در شرایط تنش کم‌آبیاری و افزایش آن با کاربرد عناصر در گیاهان مختلف گزارش شده است (Min *et al*., 2013).

کلروفیل کل

در این تحقیق اثر متقابل تنش کم‌آبی در کود سیلیس تأثیر معنی‌داری ($p \leq 0.01$) بر محتوی کلروفیل کل به همراه داشت (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل تنش کم‌آبی و کود سیلیس بر کلروفیل کل بیانگر آن بود که کاربرد کود سیلیس در کلیه تیمارهای آبیاری بر محتوی کلروفیل گیاه سورگوم تاثیرگذار بود، به‌طوری که بیشترین میزان کلروفیل کل در تیمار آبیاری مطلوب و استفاده کود سیلیس به‌صورت کود آبیاری (۱/۷۳ mg g^{-1} FW) به‌دست آمد (جدول ۳). کمترین میزان کلروفیل کل در تیمار عدم مصرف کود سیلیس در تنش شدید کم‌آبیاری (۰/۵۹ mg g^{-1} FW) مشاهده شد (جدول ۳). در همین راستا گزارش شده که تیمار سیلیس با تحریک فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اُکسیدانتی باعث کاهش نفوذپذیری غشاءپلاسمایی و در نتیجه کاهش آثار مخرب تنش‌های محیطی می‌شود (Mouss, 2006). گزارش شده است که تیمار سیلیکون باعث افزایش در فعالیت‌های فتوسنتزی تحت شرایط تنش کم‌آبی می‌گردد که ناشی از افزایش فعالیت آنزیم‌های فتوسنتزی ریبولوز بیس فسفات کربوکسیلاز و گلیسرآلدئید-۳ فسفات دهیدروژناز می‌باشد. سیلیکون علاوه بر استحکام برگ، باعث تولید بافت ناهمواری در دو سطح برگ می‌شود (Balakhnina *et al*., 2012) که در نتیجه باعث به تأخیرانداختن مرگ برگی و افزایش در محتوای کلروفیل می‌گردد. به نظر می‌رسد که کود سیلیس با کاهش اثر مخرب تنش کم‌آبیاری مانع تولید پراکسیداسیون لیپید و محتوای H_2O_2 گردیده و باعث حفظ محتوی کلروفیل شده است. این نتایج با یافته‌های سایر محققین در رابطه با گیاه گندم (*Triticum aesativum* L.) (Maghsoudi *et al*., 2013) همخوانی دارد.

ماده خشک قابل‌هضم

نتایج تجزیه واریانس نشان‌دهنده‌ی آن بود که تنها اثرات ساده رژیم‌های آبیاری و کود سیلیس بر میزان ماده خشک قابل هضم معنی‌دار ($p \leq 0.01$) شد (جدول ۴). تنش کم‌آبی منجر به افزایش ماده خشک قابل هضم گیاه شد به طوری که بیشترین میزان ماده خشک قابل هضم در تنش‌های متوسط و شدید کم‌آبی به‌ترتیب با میانگین‌های ۷۱/۲ و ۷۳/۸ درصد مشاهده شد (جدول ۵).

جدول ٤- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) صفات مورد بررسی تحت تأثیر تیمارهای آبیاری و کودی

Table 4- Results of analysis of variance (mean of squares) of studied traits affected by irrigation regimes and fertilizer treatments

منابع تغییر Source of variation	درجه آزادی df	ماده خشک قابل هضم Dry matter digestibility	پروتئین خام Crude protein	اکسین Auxin	اسید سیانیدریک Cyanic acid	وزن تر علوفه Forage fresh weight	وزن خشک علوفه Forage dry weight
Block بلوک	2	9.72ns	0.23ns	33.93ns	701ns	74.2ns	19.2ns
Irrigation آبیاری	2	1402**	16.25*	34978**	64253**	19984**	1156**
Main error خطای اصلی	4	36.7	0.97	123.6	516	25.02	5.88
Fertilizer تیمار کودی	2	358.08**	18.34**	2884.7**	909ns	976.9**	108.7**
آبیاری×کود Irrigation×Fertilizer	4	56.94ns	1.39ns	337.1**	809ns	19.5ns	11.2ns
Error خطای کل	66	26.88	2.58	45.003	681.7	66.48	8.27
ضریب تغییرات (%) CV		7.6	14.7	7.2	14.1	11.0	16.1

ns، * و **: به‌ترتیب بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار و اختلاف معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد می‌باشد.

ns, * and **: Non-significant and, significant at 1% and 5% probability level, respectively.

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر اصلی آبیاری و کودی بر صفات مورد بررسی

Table 5- Main effect comparison of irrigation and fertilizer on studied traits

آبیاری Irrigation	ماده خشک قابل هضم Dry matter digestibility (%)	پروتئین خام Crude protein (%)	اسید سیانیدریک Cyanic acid (ηmol g^{-1} of protein)	وزن تر علوفه Forage fresh weight (ton ha^{-1})	وزن خشک علوفه Forage dry weight (ton ha^{-1})
آبیاری مطلوب Full irrigation	60.2b	10.02b	129.8c	97.8a	23.7a
تنش متوسط کم‌آبی Moderate water-deficit stress	71.2a	11.32a	200.9b	79.5b	18.9b
تنش شدید کم‌آبی Severe water-deficit stress	73.8a	11.41a	223.2a	44.3c	10.7c
LSD value (5%)	4.58	0.74	17.1	3.78	1.83
Fertilization کود					
عدم مصرف No application	71.7a	10.04b	189.8a	67.1b	15.5b
محلول‌پاشی Foliar spray	68.9b	11.03a	185.7a	75.9a	18.6a
آب آبیاری Fertigation	64.5c	11.68a	178.4a	78.6a	19.2a
LSD value (5%)	2.81	0.87	14.1	4.43	1.56

حروف مشابه در هر ردیف و در ستون میانگین، فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ (براساس آزمون LSD) می‌باشند.

Means having similar letters have no significant difference at 5% probability level by LSD test.

از طرف دیگر، کود سیلیس در شرایط مختلف آبیاری درصد ماده خشک قابل هضم را کاهش داد و بر همین اساس بیشترین و کمترین میزان ماده خشک قابل هضم در تیمار عدم مصرف و مصرف کود سیلیس به‌صورت کود آبیاری با مقادیر به‌ترتیب ۷۱/۷ و ۶۴/۵ درصد حاصل گردید (جدول ۵). با توجه به این نتایج به نظر می‌رسد که تنش کم‌آبی به‌واسطه ممانعت از توسعه ساقه که درصد لیگنین و سلولز بیشتری نسبت به سایر اندام گیاه دارد، باعث بالا رفتن قابلیت هضم ماده خشک در گیاه سورگوم شده است. از طرف دیگر استفاده از کود سیلیس در آب آبیاری و محلول‌پاشی با توجه به افزایش رشد رویشی گیاه سورگوم منجر به کاهش درصد ماده خشک قابل هضم شده است. گزارش‌های مشابه در این رابطه نشان داده است که با افزایش میزان کود سیلیس در محیط ریشه، از میزان ماده خشک قابل هضم علوفه کاسته می‌شود (Sarnklong *et al*., 2010).

درصد پروتئین خام

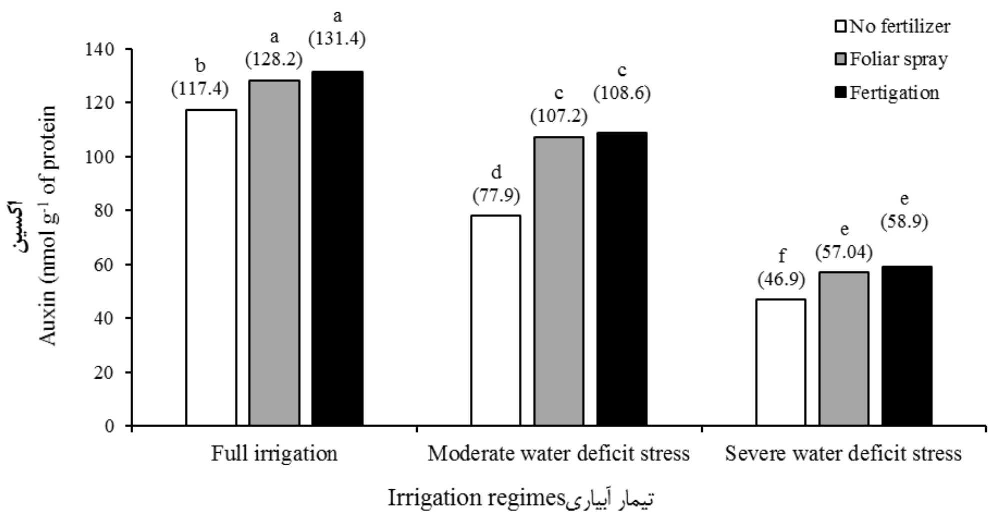
نتایج تجزیه واریانس مندرج در جدول ۴ نشان داد که اثرات ساده رژیم‌های آبیاری و کود سیلیس بر درصد پروتئین خام معنی‌دار گردید و اثرات متقابل برای این صفت معنی‌دار نشد. بر اساس نتایج مقایسه میانگین (جدول ۵) در شرایط تنش کم‌آبی، میزان پروتئین خام نسبت به آبیاری مطلوب افزایش یافت و هر دو تیمار تنش متوسط و شدید کم‌آبی با حدود یک درصد افزایش نسبت به تیمار آبیاری مطلوب، در گروه برتر قرار گرفتند. استفاده از کود سیلیس به‌صورت محلول‌پاشی و آب آبیاری منجر به افزایش پروتئین علوفه گردید به طوری که بیشترین درصد پروتئین خام با کاربرد کود سیلیس به‌صورت محلول‌پاشی (میانگین ۱۱/۰۳٪) و آب آبیاری (میانگین ۱۱/۶۸٪) به‌دست آمد که اختلافی ۰/۶۵ درصدی داشتند (جدول ۵). به‌نظر می‌رسد که افزایش در میزان پروتئین خام در تیمار تنش کم‌آبی، به‌دلیل تولید پروتئین‌های جدید و یا افزایش سطح پروتئین‌های مرتبط با سازگاری و تطابق گیاه با شرایط تنش می‌باشد که می‌توان به آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان اشاره کرد. در همین رابطه گزارش شده است که کاربرد کود سیلیس باعث افزایش محتوی پروتئین محلول، اسید آمینه آزاد و کل نیتروژن، فسفر، پتاسیم و در نهایت افزایش تولید محصول می‌گردد (Li *et al*., 2012).

محتوی هورمون اکسین

یکی از دلایل اختلات رشدی گیاه در شرایط تنش بر هم خوردن تعادل هورمون‌ها به‌ویژه اکسین می‌باشد (Keshavarz Mirzamohammadi *et al*., 2021b). بر اساس نتایج تجزیه واریانس محتوی هورمون اکسین به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر اثر متقابل رژیم‌های آبیاری و کود سیلیس قرار گرفت (جدول ۴). نتایج این مطالعه نشان‌دهنده‌ی آن بود که استفاده از کود سیلیس در کلیه تیمارهای رژیم‌های آبیاری دارای بیشترین میزان هورمون اکسین نسبت به تیمارهای عدم مصرف کود سیلیس بود به طوری که بیشترین غلظت در شرایط آبیاری مطلوب و استفاده از کود سیلیس به‌صورت کود آبیاری با میانگین (۱۳۱/۴ nmol g^{-1} of protein) و محلول‌پاشی سیلیس (۱۲۸/۲ nmol g^{-1} of protein) به‌دست آمد که هر دو با اختلافی به‌ترتیب ۱۰/۶۵ و ۸/۴۲ درصدی نسبت به تیمار عدم مصرف در گروه برتر قرار گرفتند. همچنین کمترین میزان اکسین به ثبت رسیده (۴۶/۹ nmol g^{-1} of protein) در تیمار تنش شدید کم‌آبیاری و عدم مصرف سیلیس به‌دست آمد (شکل ۲). از آنجا که هورمون اکسین سبب تحریک ریشه‌زایی و ترغیب و توسعه سیستم ریشه‌ای می‌شود، بنابراین کاهش میزان اکسین برگ در شرایط تنش دور از انتظار نیست. در واقع اکسین از برگ (محل تولید) به سمت ریشه منتقل شده تا باعث افزایش سیستم ریشه‌ای و مقابله با تنش کم‌آبی شود. نتایج مشابه این بحث بیانگر آن بود که تنش کم‌آبی باعث کاهش غلظت هورمون آکسین در مقابل تیمار آبیاری مطلوب می‌گردد درحالی که بهره‌گیری از کود سیلیس منجر به بهبود هورمون آکسین گردید (Helaly *et al*., 2017; Ryu *et al*., 2015). اگرچه در تحقیق حاضر، میزان عنصر روی در محیط ریشه و اندام گیاهی سنجیده نشد اما بر اساس گزارشات سایر محققین عنصر روی برای سنتز هورمون آکسین مورد نیاز است و پس از افزودن کود سیلیس در محیط کشت، مقدار عنصر روی در گیاه افزایش می‌یابد (Kazan, 2013). بر اساس گزارش دیگر افزودن کود سیلیس به افزایش سنتز هورمون اکسین در گیاه برنج (*Oryza sativa* L.) از طریق افزایش جذب عنصر روی موجب حفظ رشد گیاهان در شرایط تنش نیز می‌گردد (Tripathi *et al*., 2012).

اسید سیانیدریک

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تنها اثر اصلی رژیم‌های آبیاری ($p \leq 0.01$) بر محتوی اسید سیانیدریک معنی‌دار گردید (جدول ۴). نتایج این مطالعه بیانگر آن بود که با افزایش اعمال تنش کم‌آبی بر محتوی اسید سیانیدریک افزوده شده به طوری که بیشترین میزان آن با میانگین (۲۲۳/۲ nmol g^{-1} of protein) در تیمار تنش شدید کم‌آبیاری به‌دست آمد که ۴۲/۲۹٪ کمتر از تیمار آبیاری مطلوب بود (جدول ۵). در همین رابطه سایر محققین گزارش دادند که در شرایط تنش‌زا مانند کم‌آبی بلند مدت منجر به افزایش غلظت اسید سیانیدریک در سورگوم می‌گردد (Sher *et al*., 2016).



شکل ۲- مقایسه محتوی اکسین برگ تحت تأثیر برهمکنش تیمار آبیاری و کودی. حروف مشابه فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ (براساس آزمون LSD) می‌باشند.

Figure 2- Interaction between irrigation and fertilizer treatment on auxin content. Means having similar letters, have no significant difference at 5% probability level by LSD test.

وزن تر و خشک علوفه سورگوم

نتایج این تحقیق نشان‌دهنده آن بود که تنها اثرات ساده تنش کم‌آبی و کود سیلیس تأثیر معنی‌داری ($p \leq 0.01$) بر وزن تر علوفه سورگوم و وزن خشک علوفه سورگوم داشته است (جدول ۴). با افزایش شدت تنش کم‌آبی از مقادیر وزن تر علوفه کاسته شد به نحوی که تنش متوسط و شدید کم‌آبی به‌ترتیب با میانگین‌های ۷۹/۵ و ۴۴/۳ تن در هکتار، ۱۸ و ۵۴ درصد عملکرد کمتری نسبت به شرایط مطلوب آبیاری داشتند (جدول ۵). استفاده از کود سیلیس موجب افزایش وزن تر علوفه گیاه شد به طوری که بیشترین وزن تر سورگوم به‌ترتیب با میانگین ۷۸/۶ و ۷۵/۹ تن در هکتار به‌ترتیب در تیمارهای کود سیلیس به‌صورت محلول‌پاشی و کود سیلیس در آب آبیاری به‌دست آمد که نسبت به عدم کاربرد به‌ترتیب ۱۴/۶ و ۱۱/۵ درصد افزایش داشت. مشابه نتایج پژوهش حاضر، بهبود رشد گیاهان در شرایط تنش خشکی در اثر کاربرد سیلیس در گیاه گندم (Neu *et al.*, 2017; Martin *et al.*, 2017) و گیاه ذرت (*Zea mays* L.) (Asadpour *et al.*, 2022) گزارش شده است.

همچنین درخصوص وزن خشک علوفه سورگوم نتایج این مطالعه نشان داد که بهره‌گیری از کود سیلیس منجر به افزایش عملکرد وزن خشک علوفه نسبت به عدم مصرف شد به نحوی که دو سطح کودی محلول‌پاشی و کود آبیاری نسبت به تیمار عدم مصرف افزایشی ۱۶/۶ و ۱۹/۲ داشتند (جدول ۵). در این رابطه چنین استدلال می‌گردد که کاربرد سیلیس به دلیل افزایش و بهبود محتوی نسبی آب و کاهش نشت یونی، حفظ شاخص سطح برگ گیاه، محتوی کلروفیل و هدایت روزنه‌ای منجربه افزایش عملکرد علوفه سورگوم می‌گردد. نتایج مشابه دیگر در این رابطه گزارش شده است که کاربرد سیلیس در شرایط تنش کم‌آبی گیاه ذرت (Amin *et al.*, 2018) و گیاه جو (*Hordeum vulgare* L.) (Balakhnina *et al.*, 2012) به علت افزایش فتوسنتزی و کاهش تعرق باعث بهبود رشد و عملکرد می‌شود. (Artyszak, 2018) اثربخشی کود سیلیس بر عملکرد گیاه را به کارکرد بهتر غشاهای زیستی با تغذیه سیلیکون نسبت دادند. بیشترین وزن خشک علوفه نیز در تیمار آبیاری مطلوب (۲۳/۷ تن در هکتار) به‌دست آمد که نسبت به تنش متوسط و شدید کم‌آبی افزایشی ۲۰/۲٪ و ۵۴/۸٪ داشت (جدول ۵). یکی از دلایل کاهش عملکرد در شرایط تنش را می‌توان به کاهش فتوسنتز حاصل از کاهش آب قابل دسترس در محدوده ریشه نسبت داد که این مسأله می‌تواند منجر به کاهش کاهش هدایت روزنه (کمتر شدن ورود دی‌اکسید کربن) و همچنین کاهش سطح برگ باشد (Zegada-Lizarazu & Iijima, 2005).

نتیجه‌گیری

نتایج این آزمایش نشان داد که بروز تنش کم‌آبی از طریق تأثیر بر شاخص سطح برگ، محتوی نسبی آب برگ، نشت یونی، کاهش هدایت روزنه‌ای و همچنین شاخص‌های کلروفیل کل منجر به کاهش وزن تر و خشک علوفه‌سورگوم گردید. از طرف دیگر بهره‌گیری از

کود سیلیس از طریق پایداری غشا و حفظ محتوای نسبی آب بگـر و کاهش نشت یونی سبب حفظ ساختار رویشی گیاه شد. کـود سـیلیس در شرایط تنش کم‌آبی منجر به کاهش ماده خشک قابل هضم گردید اما از طرف دیگر منجر به افزایش میـزان پـروتئین خـام و همچنـین کاهش میزان ماده سمی اسید سیانیدریک در علوفه تولیدی شد. نکته قابل توجه دیگر این است که استفاده از کـود سـیلیس مـی‌توانـد در افزایش عملکرد و وزن خشک سورگوم تأثیرگذار باشد و در ایـن بـین محلول‌پاشی کود سـیلیس مـوثر تـر از مصـرف در آب آبیـاری بـود و بیشترین تأثیر را در تخفیف تنش کم‌آبی داشـت. بنـابر نتـایج حاصـله می‌توان توصیه نمود که کود سیلیس برای حفظ رشـد و نمـو طبیعـی گیاه علوفه‌ای سورگوم به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مد نظر کشاورزان قـرار گیـرد. بـا ایـن حـال، اسـتفاده گسـترده آن در سـایر محصولات زراعی نیاز به بررسی دارد.

References

1. Ahmadi Najafabadi, M., Askari, H., & Soltani Najafabadi, M. (2015). Study of Hydrogen Cyanide Effects on Salt Stress Induction in Aeluropus littoralis. *Genetic Engineering and Biosafety Journal*, *4*(1), 55-66.
2. Ahmed, A. A., Hassan, M. S. M., & El Naim, A. M. (2016). Evaluation of some local sorghum genotypes in north Kordofan of Sudan semi-arid agro-ecological environment. *International Journal of Agriculture and Forestry*, *6*(1), 54-57.
3. Ahmed, I. M., & Rajab, M. N. (2017). Estimate of Genetic Parameters and Correlation Coefficient in Sudan Grass (*Sorghum sudanense* (Piper) Staff). *Journal of Plant Production*, *8*(9), 935-938. https://doi.org/10.21608/jpp.2017.40915
4. Ahmed, M., Qadeer, U., & Aslam, M. A. (2011). Silicon application and drought tolerance mechanism of sorghum. *African Journal of Agricultural Research*, *6*(3), 594-607.
5. Ali, E., Iqbal, A., Hussain, S., Shah, J. M., Said, F., & Imtiaz, M. (2019). Selection criteria to assess drought stress tolerance in wheat genotypes using physiological and biochemical parameters. *Biosciences Biotechnology Research Asia*, *16*(4), 751-762. https://doi.org/10.13005/bbra/2791
6. Amin, M., Ahmad, R., Ali, A., Hussain, I., Mahmood, R., Aslam, M., & Lee, D. J. (2018). Influence of silicon fertilization on maize performance under limited water supply. *Silicon*, *10*(2), 177-183. https://doi.org/10.1007/s12633-015-9372-x
7. Artyszak, A. (2018). Effect of silicon fertilization on crop yield quantity and quality-A literature review in Europe. *Plants*, *7*(3), 54. https://doi.org/10.3390/plants7030054
8. Asadpour, S., Madani, H., Nour Mohammadi, Gh., Majidi Heravan, I., & Heidari Sharif Abad, H. (2022). Improving maize yield with advancing planting time and nano-silicon foliar spray alone or combined with zinc. *Silicon*, *14*, 201-209. https://doi.org/10.1007/s12633-020-00815-5
9. Balakhnina, T. I., Matichenkov, V. V., Wlodarczyk, T., Borkowska, A., Nosalewicz, M., & Fomina, I. R. (2012). Effects of silicon on growth processes and adaptive potential of barley plants under optimal soil watering and flooding. *Plant Growth Regulation*, *67*(1), 35-43. https://doi.org/10.1007/s10725-012-9658-6
10. Behera, S. K., & Panda, R. K. (2009). Effect of fertilization and irrigation schedule on water and fertilizer solute transport for wheat crop in a sub-humid sub-tropical region. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, *130*, 141-155. https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.12.009
11. Blaney, B. J., & Dodman, R. L. (2002). Production of zearalenone, deoxynivalenol, nivalenol, and acetylated derivatives by Australian isolates of *Fusarium graminearum* and F. *pseudograminearum* in relation to source and culturing conditions. *Australian Journal of Agricultural Research*, *53*(12), 1317-1326. https://doi.org/10.1071/AR02041
12. Eastin, J. D. (1980). Sorghum development and yield. In s. Yoshida (ed) symp. On potential productivity of field crops under different environments. Losbanos, Philippines. 22-26 sept.
13. FAO (Food and Agriculture of United Nation). 2020. World food situation, FAO cereal supply and demand brief, 7 September, Retrieved from http://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/en/
14. Ghanem, H. E., Aldesuquy, H. S. & Elshafii, H. A. (2019). Silicon Alleviates Alkalinity Stress of Sorghum (*Sorghum Bicolor* L.) Plants by Improving Plant Water Status, Pigments, Protein, Nucleic Acids and Carbohydrates Contents. *AATPS*, *2*(2), 180027.
15. Hadebe, S. T., Modi, A. T., & Mabhaudhi, T. (2017). Drought tolerance and water use of cereal crops: A focus on sorghum as a food security crop in sub-Saharan Africa. *Journal of Agronomy and Crop Science*, *203*(3), 177-191. https://doi.org/10.1111/jac.12191
16. Hayes, B. J., Lewin, H. A., & Goddard, M. E. (2013). The future of livestock breeding: genomic selection for efficiency, reduced emissions intensity, and adaptation. *Trends in genetics*, *29*(4), 206-214. https://doi.org/10.1016/j.tig.2012.11.009
17. He, Y., Oyaizu, H., & Suzuki, S. (2002). Indole-3-acetic acidproduction in Pseudomonas fluorescens HP72 and its association with suppression of creepingbentgrass brown patch. Current Microbiology, 47, 138-143.

https://doi.org/10.1007/s00284-002-3968-2
18. Helaly, M. N., El-Hoseiny, H., El-Sheery, N. I., Rastogi, A., & Kalaji, H. M. (2017). Regulation and physiological role of silicon in alleviating drought stress of mango. *Plant Physiology and Biochemistry*, *118*, 31-44. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.05.021
19. Hou, Sh., Zhu, J., Ding, M., & Guohua, L.V. (2008). Simultaneous determination of gibberellic acid, indole-3-acetic acid and abscisic acid in Wheat extracts by solid-phase extraction and liquid chromatography-electrospray tandem mass spectrometry. *Talanta*, *76*(4), 798-802. https://doi.org/10.1016/j.talanta.2008.04.041
20. Jabereldar, A. A., El Naim, A. M., Abdalla, A. A., & Dagash, Y. M. (2017). Effect of water stress on yield and water use efficiency of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) in semi-arid environment. *International Journal of Agriculture and Forestry*, (1), 1-6.
21. Jafari, A., Connolly, V., Frolich, A., & Walsh, E. K. (2003). A note on estimation of quality in perennial ryegrass by near infrared spectroscopy. *Irish Journal of Agriculture and Food Research*, *42*, 293-299.
22. Kalteh, M., Alipour, Z. T., Ashraf, S., Marashi Aliabadi, M., & Falah Nosratabadi, A. (2018). Effect of silica nanoparticles on basil (*Ocimum basilicum*) under salinity stress. *Journal of Chemical Health Risks*, *4*(3), 251-259
23. Kazan, K. (2013). Auxin and the integration of environmental signals into plant root development. *Annals of Botany*, *112*(9), 1655-1665. https://doi.org/10.1093/aob/mct229
24. Keshavarz Mirzamohammadi, H., Modarres-Sanavy, S. A. M., Sefidkon, F., Mokhtassi-Bidgoli, A., & Mirjalili, M. H. (2021a). Irrigation and fertilizer treatments affecting rosmarinic acid accumulation, total phenolic content, antioxidant potential and correlation between them in peppermint (*Mentha piperita* L.). *Irrigation Science, 39*, 671-683. https://doi.org/10.1007/s00271-021-00729-z
25. Keshavarz Mirzamohammadi, H., Tohidi-Moghadam, H. R., & Hosseini, S. J. (2021b). Is there any relationship between agronomic traits, soil properties and essential oil profile of peppermint (*Mentha piperita* L.) treated by fertiliser treatments and irrigation regimes? *Annual Applied Biology*, *179*(3), 331-344. https://doi.org/10.1111/aab.12707
26. Keshavarz, H., & Khodabin, Gh. (2019). The role of uniconazole in improving physiological and biochemical attributes of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) subjected to drought stress. *Journal of Crop Science and Biotechnology*, *22*(2), 161-168. https://doi.org/10.1007/s12892-019-0050-0
27. Lauriault, L., M.A. Marsalis and D.M. VanLeeuwen. 2012. Planting date affects rainfed sorghum forage yields in semiarid, subtropical environments. Forage and Grazinglands, 10(1): 27-35. https://doi.org/10.1094/FG-2012-0416-01-RS
28. Levitt, J. (1980). *Responses of Plants to Environmental Stress, Volume 1: Chilling, Freezing, and High Temperature Stresses*. Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-445501-6.50016-6
29. Li, P., Song, A., Li, Z., Fan, F., & Liang, Y. (2012). Silicon ameliorates manganese toxicity by regulating manganese transport and antioxidant reactions in rice (*Oryza sativa* L.). *Plant and Soil*, *354*(1-2), 407-419. https://doi.org/10.1007/s11104-011-1076-4
30. Lichtenthaler, H. K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*, *148*, 350-382. https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1
31. Maghsoudi, K., Emam, Y., & Pessarakli, M. (2016). Effect of silicon on photosynthetic gas exchange, photosynthetic pigments, cell membrane stability and relative water content of different wheat cultivars under drought stress conditions. *Journal of Plant Nutrition*, *39*(7), 1001-1015. https://doi.org/10.1080/01904167.2015.1109108
32. Martin, T. N., Nunes, U. R., Stecca, J. D. L., & Pahins, D. B. (2017). Foliar application of silicon on yield components of wheat crop. *Revista Caatinga, 30*(3), 578-585. https://doi.org/10.1590/1983-21252017v30n305rc
33. Menezes, C. B., Saldanha, D. C., Santos, C. V., Andrade, L. C., Mingote Júlio, M. P., Portugal, A. F., & Tardin, F. D. (2015). Evaluation of grain yield in sorghum hybrids under water stress. *Genetics and Molecular Research*, *14*(4), 12675-12683. https://doi.org/10.4238/2015.October.19.11
34. Moussa, H. R. (2006). Influence of exogenous application of silicon on physiological response of salt-stressed Maize (*Zea mays* L.). *International Journal of Agriculture and Biology*, *2*, 293-297.
35. Moussa, H. R. (2006). Influence of exogenous application of silicon on physiological response of salt-stressed Maize (*Zea mays* L.). *International Journal of Agriculture and Biology*, *2*, 293-297.
36. Neu, S., Schaller, J., & Dudel, E. G. (2017). Silicon availability modifies nutrient use efficiency and content, C: N: P stoichiometry, and productivity of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *Scientific Reports*, *7*(1), 1-8. https://doi.org/10.1038/srep40829
37. Rizal, G., Karki, S., Alcasid, M., Montecillo, F., Acebron, K., Larazo, N., Garcia, R., Slamet-Loedin, I. H., & Quick, W. P. (2014). Shortening the breeding cycle of sorghum, a model crop for research. *Crop Science*, *54*(2), 520-529. https://doi.org/10.2135/cropsci2013.07.0471
38. Ryu, H., & Cho, Y. G. (2015). Plant hormones in salt stress tolerance. *Journal of Plant Biology*, *58*(3), 147-155. https://doi.org/10.1007/s12374-015-0103-z
39. Sarnklong, C., Cone, J. W., Pellikaan, W., & Hendriks, W. H. (2010). Utilization of rice straw and different

treatments to improve its feed value for ruminants: a review. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, *23*(5), 680-692. https://doi.org/10.5713/ajas.2010.80619

40. Sher, A., Ansar, M., Ijaz, M., & Sattar, A. (2016). Proximate analisis of forage sorghum cultivar with different doses of nitrogen and seed rate. *Fields Crops Turkish Journal*, *21*, 276-285. https://doi.org/10.17557/tjfc.60032
41. Shi, Q., Bao, Z., Zhu, Z., Ying, Q., & Qian, Q. (2006). Effects of different treatments of salicylic acid on heat tolerance, chlorophyll fluorescence, and antioxidant enzyme activity in seedlings of *Cucumissativa* L. *Plant Growth Regulation*, *48*(2), 127-135. https://doi.org/10.1007/s10725-005-5482-6
42. Tahir, M. A., Rahmatullah, T., Aziz, M., Kanwal, A. S., & Maqsood, M. A. (2006). Beneficial effects of Silicon in wheat (*Triticum aestivum* L.) under salinity stress. *Pakistan Journal of Botany*, *38*(5), 1715-1722.
43. Tripathi, D. K., Singh, V. P., Kumar, D., & Chauhan, D. K. (2012). Rice seedlings under cadmium stress: effect of silicon on growth, cadmium uptake, oxidative stress, antioxidant capacity and root and leaf structures. *Chemistry and Ecology*, *28*(3), 281-291. https://doi.org/10.1080/02757540.2011.644789
44. Wang, Y., Chen, P., Sun, L., Li, Q., Dai, S., Sun, Y., Kai, W., Zhang, Y., Liang, B., & Len, P. (2015). Transcriptional regulation of PaPYLs, PaPP2Cs and PaSnRK2s during sweet cherry fruit development and in response to abscisic acid and auxin at onset of fruit ripening. *Plant Growth Regulation*, *75*, 455-464. https://doi.org/10.1007/s10725-014-0006-x
45. Yin, L., Wang, S., Li, J., Tanaka, K., & Oka, M. (2013). Application of silicon improves salt tolerance through ameliorating osmotic and ionic stresses in the seedling of Sorghum bicolor. *Acta Physiologiae Plantarum*, *35*(11), 3099-3107. https://doi.org/10.1007/s11738-013-1343-5
46. Yin, L., Wang, S., Tanaka, K. Fujihara, S., Itai, A., Den, X., & Zhang, S. (2016). Silicon-mediated changes in polyamines participate in silicon-induced salt tolerance in *Sorghum bicolor* L. *Plant, Cell and Environment*, *39*(2), 245-258. https://doi.org/10.1111/pce.12521
47. Zegada-Lizarazu, W., & Iijima, M. (2005). Deep root water uptake ability and water use efficiency of pearl millet in comparison to other millet species. *Plant Production Science*, *8*, 454-460. https://doi.org/10.1626/pps.8.454